

文章编号: 1000-8055(2002)05-0542-07

多级轴流压气机机匣处理级的探讨

吴艳辉, 朱俊强, 刘志伟

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文提出了一种确定多级轴流压气机机匣处理级的新方法。首先, 预测多级轴流压气机各级的级极限负荷, 依此确定旋转失速发生时率先失速的级并得到实验证实; 其次, 将率先失速级作为待处理的级, 并在一亚音速双级轴流压气机实验台上针对四种不同型式的机匣处理, 进行了较为系统的实验验证。实验结果证实, 在率先失速级上进行机匣处理会取得很好的扩稳效果, 用级极限负荷来确定多级轴流压气机机匣处理级的方法具有广阔的应用前景。

关键词: 轴流压气机; 级极限负荷; 机匣处理

中图分类号: V 231.9

文献标识码: A

Research on the Axial Position of Treated Casing in Multistage Axial-Flow Compressors

WU Yan-hui, ZHU Jun-qiang, LIU Zhiwei

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A new method for determining the axial position of treated casing in multistage axial-flow compressors is set up in this paper. Firstly, the stalling pressure rise capability of axial-flow compressor stages is predicted, and the stage in which stall occurs first could be located theoretically and be verified experimentally. Secondly, the stage stall appearing first is taken as the axial position of treated casing. The idea is verified in a systematic way with the help of four kinds of different casing treatment in a subsonic two-stage axial-flow compressor. Experimental results indicate that the treated casing placed on the first stalling stage could improve the stall margin better. The method presented in the paper could be used as the guide in the casing treatment design for determining the axial position of the treated casing.

Key words: axial flow compressor; stalling pressure rise capability; treated casing

1 引言

解决多级轴流压气机的失速问题, 预测率先失速级是第一步, 也是关键的一步。文献[1]中, Koch C C 应用 GE 公司大量的叶栅吹风数据, 建立了级极限负荷与叶栅几何参数之间的半经验关

系, 经多台多级轴流压气机考核, 所预测的级极限负荷与实验测量结果吻合较好。本文发展了文献[1]中提出的方法, 并用其预测了某八级轴流压气机的级极限负荷, 指出级负荷最重的级是率先失速的级, 并得到了空军工程大学在原型机上实验结果的验证。在此基础上提出率先失速的级就是

收稿日期: 2001- 11- 19; 修订日期: 2002- 03- 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2002CG0702); 航空科学基金资助项目(2000CB0705)

作者简介: 吴艳辉(1972-), 女, 新疆伊犁人, 西北工业大学航空动力与热力工程系博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究

多级轴流压气机中要进行机匣处理的级,同时借助于一双级轴流压气机实验台,借鉴以往机匣处理的经验^[2~6],对其进行了较为系统的实验研究,再次证实了级负荷最重的级就是率先失速级,验证了在率先失速的级上进行机匣处理能收到很好扩稳效果的设想。

2 预测多级轴流压气机级负荷的方法

研究发现,在一个二元扩压器中,对于一个给定的扩散长度 N 与进口宽度 W_1 之比(N/W_1),最大静压升系数必然对应着一个面积比,如果进一步增加面积比,则会出现分离,从而使得静压升系数减小。轴流压气机的设计思路,借鉴了二元扩压器的许多知识,与二元扩压器相比较,压气机级叶栅中工质所流经的面积比不是固定不变的,因而它并不只是由叶片的几何尺寸决定的,当叶栅节流以增加攻角时,面积比将增大,造成叶栅发生失速,达到最大静压升。经大量实验研究发现,压气机叶栅出口垂直于气流方向的宽度 g_2 在整个工作范围中大致保持不变。GE 公司通过大量的实验数据,将叶栅实验测出的失速压升系数 C_h 用叶栅通道 Re 数、叶片轴向间隙与栅距之比 $\Delta z/s$ 、叶顶间隙与平均叶栅安装间隙之比 ϵ/g 进行修正,得到 $Re=1.3 \times 10^5$, $\Delta z/s=38\%$, $\epsilon/g=5.5\%$ 工况下的 C_{hadj} 。然后经有效动压头因子 F_{ef} (有效动压头与动叶出口的自由气流的动压头之比)的修正,即得到失速有效静压升 C_{hefo} 。它与叶型中段长度 L 与叶栅出口垂直与气流方向的宽度 g_2 之比 L/g_2 变化关系曲线如图 1 所示,图中曲线为二元扩压器在 9%堵塞时的分离极限压升,压气机叶栅失速有效静压升 C_{hef} 随 L/g_2 的变化,则如图中各点所示。实验数据表明,压气机的有效静压升系数的变化与二元扩压器的分离极限压升是一致的,说明了 L/g_2 的确反映了叶栅通道几何参数对失速压升系数的影响。这也从侧面印证了 GE 公司所建立的这一归纳性的修正判据是可行的,具有工程适用价值。

3 八级轴流压气机率先失速级的预测

GE 公司投入大量的人力物力进行该项实验研究的目的是在压气机的设计初步完成之后,由已知的 L/g_2 值,根据二元扩压器的分离准则来

求得各级的失速压升系数,从而预测出率先失速级,以便尽早地对压气机主要设计参数进行符合失速裕度的修改。本文消化吸收了 GE 公司所做的归纳性的结论,整理了一套预测多级轴流压气机各级的级极限负荷的方法,并把它用于对某八级轴流压气机的率先失速级进行预测。

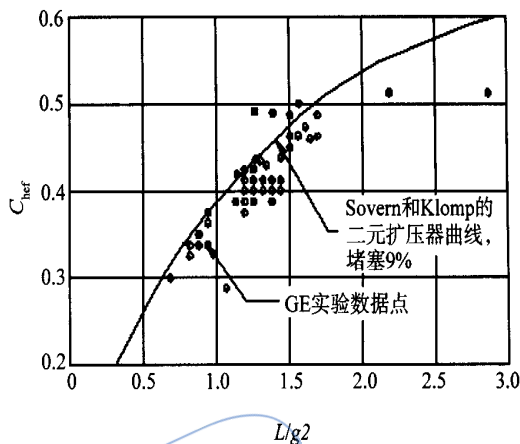


图 1 失速有效压升系数的变化

Fig 1 Variation of stalling effective static pressure-rise coefficient

利用 GE 公司的研究成果估算多级轴流压气机各级的级极限负荷 C_h 的方法为:

- (1) 计算出各级的 L/g_2 的值并代入图 1 所示曲线的拟合公式,求出多级轴流压气机各级的失速有效压升 C_{hefo}
- (2) 由各级的速度三角形计算出各级的动压头因子 F_{ef} ,由 $C_{hadj}=F_{ef}C_{hefo}$ 求出修正前的 C_{hadj}
- (3) 求出各级的 Re , $\Delta z/s$, ϵ/g ,根据经验拟合关系求出修正系数 K_{Re} , $K_{\Delta z/s}$, $K_{\epsilon/g}$,然后由 $C_k=K_{Re}K_{\Delta z/s}K_{\epsilon/g}C_{hadj}$ 预测出多级轴流压气机各级的级极限负荷。

表 1 给出了根据 W P 8 八级轴流压气机相关的几何参数和气动参数计算出的各级的无量纲参数。

表 2 给出了按照上述计算方法得到的各级相关的修正系数、动压因子以及相对转速 $\tilde{n}=0.8$ 下各级的级极限负荷的值。

图 2 是各级的级极限负荷随级序数的变化趋势。从图中可以看出该八级轴流压气机的第三级和第四级的级极限负荷较高,很可能成为率先失速的级。空军工程大学在某厂原型机上,利用 8 个动态压力传感器在线测定了它的率先失速级,实验结果证实级极限负荷最高的级(第三级)即为率先失速的级,说明用该方法进行多级轴流压气机

表 1 各级的无量纲参数
Table 1 Stages' nondimensional parameters

级数	1	2	3	4	5	6	7	8
$Re/10^5$	14.8	15.8	17.3	21.1	23.9	27.2	24.0	25.7
ϵ/g	0.026	0.030	0.043	0.052	0.057	0.074	0.095	0.104
$\Delta z/s$	0.176	0.209	0.321	0.332	0.337	0.380	0.329	0.470
$L/g2$	1.02	1.19	1.67	1.85	1.88	1.92	1.73	1.81

表 2 各级修正系数、动压头因子、级极限负荷的预测值
Table 2 Stage's crrection coefficients, dynam ic pressure factors, and predicted values
of stalling pressure rising capability

级数	1	2	3	4	5	6	7	8
K_{Re}	1.046	1.041	1.041	1.043	1.042	1.047	1.044	1.045
$K_{\Delta z/s}$	1.074	1.057	1.014	0.988	0.976	0.948	0.939	0.943
$K_{\epsilon/g}$	1.040	1.030	1.004	1.003	1.002	0.997	1.003	0.993
F_{ef}	0.948	0.905	0.889	0.906	0.963	1.024	1.097	1.156
C_h	0.321	0.347	0.517	0.507	0.460	0.414	0.405	0.399

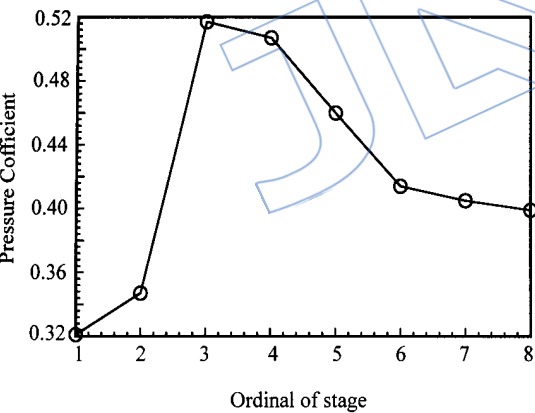


图 2 各级极限负荷的变化

Fig 2 Variation of stalling pressure rise capability

率先失速级的预测是可行的。

4 双级轴流压气机机匣处理级的预测

在多级轴流压气机设计中, 因为稳定工作裕度不足而应用机匣处理时, 设计者们最关心的问题, 就是将机匣处理置于多级压气机的哪一级。事实证明, 同一种机匣处理, 在不同的级上处理得到

的效果可以相差很大, 找准恰当的级可以达到事半功倍的效果, 因而有必要对多级轴流压气机中机匣处理级进行探讨。

这里作者进一步发展了上节提出的预测多级轴流压气机率先失速级的方法, 对西北工业大学叶轮机实验室双级轴流压气机叶尖部失速点附近的级极限负荷进行了预测, 提出叶尖部级极限负荷最重的级就是要进行机匣处理的级, 并在该双级实验台上进行了实验验证。

表 3 双级轴流压气机级极限负荷的预测值
Table 3 The predicted values of stalling pressure
rising capability in a two-stage
axial flow compressor

换算转速/(r/m in)	5059	8130
第一级极限负荷	0.297	0.520
第二级极限负荷	0.206	0.339

表 3 给出了双级轴流压气机在两个换算转速下第一级和第二级叶尖部基元叶片失速点附近的级极限负荷。从表中数据看出, 无论在低转速或高转速下, 第一级的叶尖部基元级的级极限负荷都

比第二级的相应值来得高,说明该双级压气机的第一级比第二级较易产生气流分离,导致失速现象的发生。该双级实验台的实验结果也验证了第一级是率先失速级,再一次证明了用上节提出的半经验方法预测多级轴流压气机的率先失速级是可靠的。

5 机匣处理级的实验验证

5.1 实验装置及测试系统

实验在西北工业大学双级轴流压气机实验台上完成。实验台主要由调速电机、增速器、实验段、排气段和移动式锥体节气装置组成。双级轴流压气机主要参数为: 轮毂比 0.61, 尖部直径 0.298 m, 设计转速 8800 r/min, 设计压比 1.14, 设计效率 0.79。根据实验目的设计了 5 支耙状探针, 分别安装于双级实验台试验段第一级转子进口、第一级静子进口、第二级转子进口、第二级静子进口、第二级静子出口等五个测量截面上。每支探针上固定有 5 个三管形压力探针和 5 个镍铬—镍硅热电偶, 如图 3 所示。压力采集系统由 586 微机、DA S20 数据采集板、扫描阀、耙状探针组成。温度采集系统由 586 微机、DA S58 数据采集板、PRESTON 高精度阻隔式放大器、多路转换开关、耙状探针组成。测量系统中的热电偶及三孔针均经过系统校正, 压力测量误差不超过 0.5 mm 水柱, 温度测量误差不超过 0.2 °C。

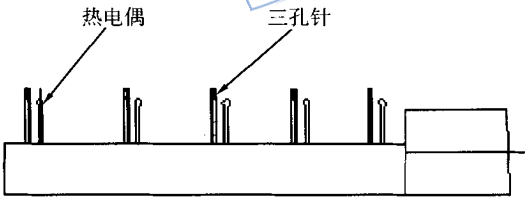


图 3 耙状探针

Fig 3 General layout of tested probe

5.2 处理机匣的结构特征

实验用的“前置凸台周向槽式”处理机匣的结构如图 4 所示, 设计参数具体为: 槽深 d /mm、槽宽 w /mm 和齿宽 b /mm、槽数 n 、轴向位置 δ /mm、凸台的前部尺寸 a /mm、转子叶尖的深入量 p /mm、叶顶环壁角 α /(°)及叶顶间隙 ϵ /mm。为了实验分析的需要, 针对第一级和第二级各设计了两种几何状态的处理机匣, 其参数见表 4。表中 S1 为第一级实壁机匣, S2 为第一级“前置凸台周向

槽式”处理机匣, E1 为第二级实壁机匣, E2 为第二级“前置凸台周向槽式”处理机匣。第二级的转子间隙较大(0.7 mm), 为避免凸台过大引起过大的流动损失, 第二级转子叶尖伸入量取值为-0.1 mm, 这样第二级“前置凸台周向槽式”处理机匣的凸台高度为 0.6 mm, 仍与该级的叶顶间隙相当。

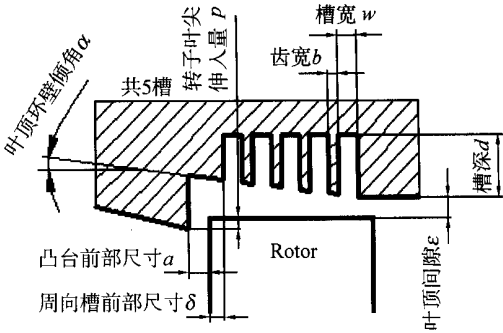


图 4 处理机匣结构简图

Fig 4 General layout of treated casing

5.3 实验结果分析

为了便于分析处理机匣放置级对压气机性能的影响, 在双级压气机上进行了四种组合状态机匣的实验, 分别为 S1E1, S1E2, S2E1 和 S2E2, 其中 S1E1 为双级实验台的参考标准, 实验结果见表 5。

表中采用了两种裕度改进百分数的定义, 流量裕度改进量定义为:

$$\Delta\Phi = 1 - \Phi_{ts2}/\Phi_{ts1}$$

其中: Φ_{ts2} 和 Φ_{ts1} 分别为对应处理机匣和实壁机匣的失速点流量系数。

定义综合裕度改进量为:

$$\Delta\Phi_2 = (\Phi_{ts1}/\Phi_{ts2} \times \psi_{ts2}/\psi_{ts1} - 1)$$

其中: ψ_{ts2} 和 ψ_{ts1} 分别为处理机匣和实壁机匣的失速点压升系数。

峰值效率改进量:

$$\Delta\eta_m = (\text{峰值点效率})_{\text{处理机匣}} - (\text{峰值点效率})_{\text{实壁机匣}}$$

失速点效率改进量:

$$\Delta\eta_s = (\text{失速点效率})_{\text{处理机匣}} - (\text{失速点效率})_{\text{实壁机匣}}$$

从表中可看到 S2E2 的流量裕度及综合裕度的改进量最大, 其次为 S2E1, 最后为 S1E2, 但由 S2E1 至 S2E2, 流量裕度和综合裕度的改进量增长不明显, 特别是高速下, 流量裕度的改进量从

表 4 四种处理机匣的设计参数

Table 4 Design parameters of four kinds of treabed casings

类型	ϵ	α	n	w	b	d	δ	a	p
S1	0.3	0.0	—	—	—	—	—	—	—
S2	0.3	0.0	5	2.5	1.3	8.0	0.2	1.8	0.0
E1	0.7	0.0	—	—	—	—	—	—	—
E2	0.7	0.0	5	2.5	1.3	8.0	0.2	1.0	- 0.1

表 5 四种组合状态机匣的实验结果

Table 5 Experimental results of four kinds of built-up treabed casings

几何状态	S2E2		S2E1		S1E2	
$n_{cor}/(r/m\ in)$	5059	8130	5059	8130	5059	8130
$\Delta\Phi_1/\%$	5.52	8.28	3.35	7.45	2.53	5.59
$\Delta\Phi_2/\%$	5.75	8.75	3.40	7.81	2.57	5.77
$\Delta\eta_s/\%$	- 0.81	- 1.74	- 0.81	- 1.59	- 0.81	- 0.28
$\Delta\eta_m/\%$	- 1.05	- 3.26	- 1.05	- 3.11	- 1.05	- 0.53

S2E1 的 7.45% 增到 8.28%，增长不到 1%。这说明：(1) 对第一级进行机匣处理，可以取得较第二级进行机匣处理要好的扩稳效果；(2) 双级都用机匣处理，稳定工作范围可以在有较好扩稳效果的第一级处理的基础上继续拓宽，但拓宽余地不大。

和 S2E2 第一级都采用了“前置凸台周向槽式”处理机匣，增加了流动损失，因而其压比和效率比 S1E2 低很多。S2E1 和 S2E2 第一级转子的特性线几乎重合，说明第二级是否采用机匣处理对第一级转子特性影响很小。

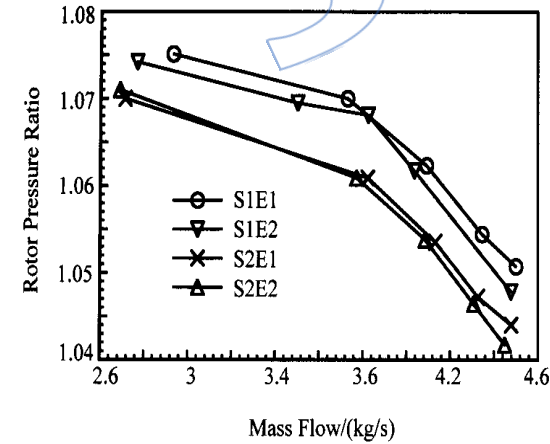


图 5 第一级转子压比特性

Fig 5 First-stage pressure ratio characteristic

图 5 和图 6 给出了四种组合型式的处理机匣对双级压气机第一级转子特性的影响，曲线表明 S1E2 的第一级转子压比和效率明显高于 S2E1 及 S2E2，这是由于 S1E2 处理的是双级压气机的第二级，第一级受影响相对较少，流动损失增加不多，所以其效率和压比和实壁相差不多。而 S2E1

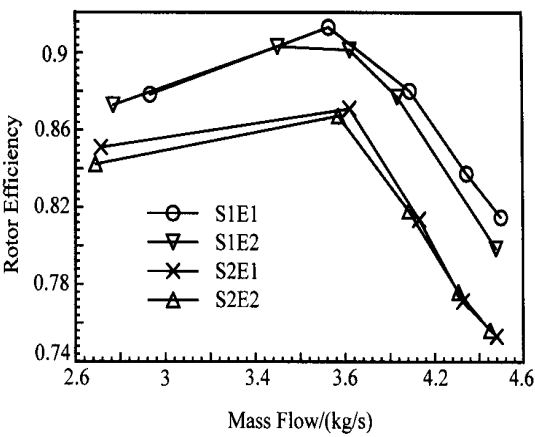


图 6 第一级转子效率特性

Fig 6 First-stage efficiency characteristic

图 7 和图 8 给出了四种组合型式的处理机匣对双级压气机第二级转子特性的影响。曲线表明 S2E1 的压比和效率都比其它两者高，与实壁接近，这是因为 S2E1 的第二级为实壁机匣，比起第二级有机匣处理的 S1E2 及 S2E2，第二级的流动损失要少一些。尽管 S1E2 和 S2E2 的第二级上带

有相同的处理机匣, 但它们的特性线并不重合, S2E2 的特性线要低于 S1E2, 这是由于 S2E2 第一级也带有处理机匣, 对第二级转子的流场造成一

定的影响, 加大了第二级转子的损失, 也说明了双级压气机的第一级是否带有处理机匣对第二级转子的性能有较大的影响。

图 9 和图 10 给出四种组合型式的处理机匣对双级压气机总性能的影响。曲线表明: 无论在双级压气机的第一级、第二级或是两级都进行机匣处理, 其总压比和效率都低于实壁机匣; S2E2, S2E1, S1E2 压比和效率的排序与其扩稳效果的顺序正好相反, 即扩稳效果越好, 压比和效率越低; S2E1 和 S2E2 对双级压气机压比和效率特性的影响已相差不多, 两条特性线几乎重合, S2E1 失速点和峰值点效率的改进量分别为 - 1.59% 和 - 3.11%, 而 S2E2 失速点和峰值点效率的改进量分别为 - 1.74%, - 3.26% (由表 5 得)。

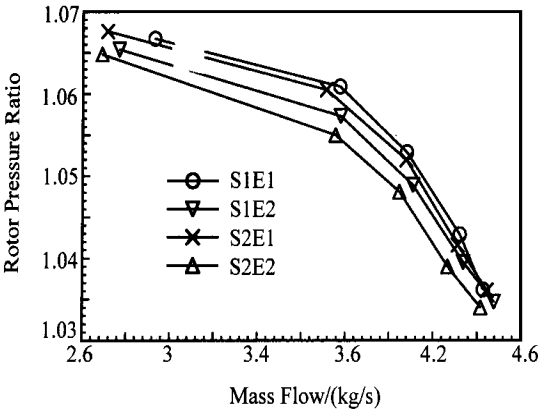


图 7 第二级转子压比特性
Fig 7 Second-stage pressure ratio characteristic

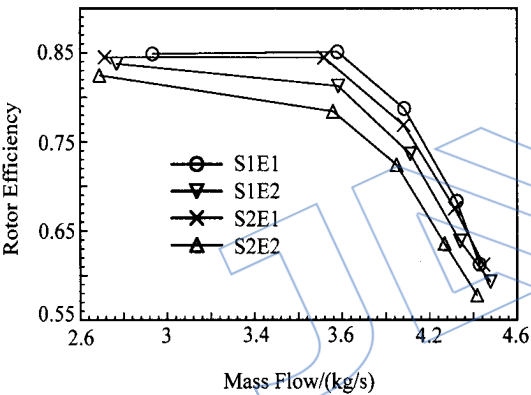


图 8 第二级转子效率特性
Fig 8 Second-stage efficiency characteristic

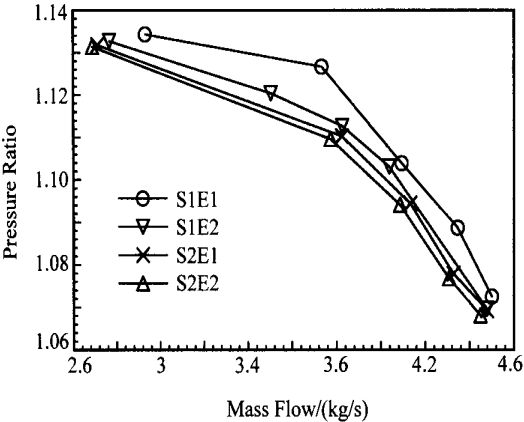


图 9 双级总压比特性
Fig 9 Total pressure ratio characteristic

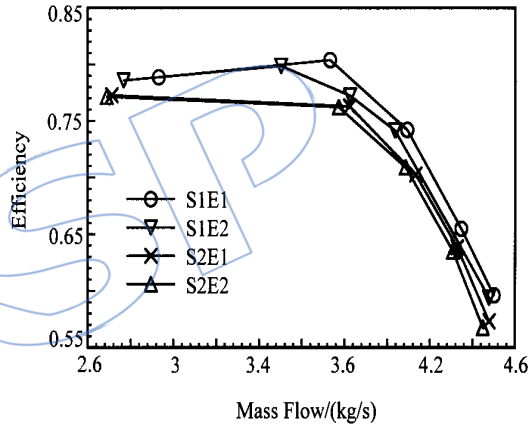


图 10 双级总效率特性
Fig 10 Total efficiency characteristic

综上所述, S2E2 较之与 S2E1 虽然扩稳能力有所上升, 但拓展的空间已很小, 仅为约 1%, 而且二者对双级压气机性能的影响程度几乎相当, 因此, 对第一级进行机匣处理已完全可以满足工程上的需要。

6 结 论

本文提出的多级轴流压气机机匣处理级的确定方法, 在一双级轴流压气机实验台上得到了很好的实验验证, 即对级负荷较高的第一级进行机匣处理, 要比单独处理第二级的扩稳效果好得多, 与两级都处理的效果相当。这说明根据多级轴流压气机各个分级叶尖部基元级的极限负荷的比较来确定处理机匣放置的级, 抓住了影响稳定裕度的关键问题, 能收到很好的扩稳效果, 具有工程应用前景。

参考文献

[1] Koch C C. Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor Stages[J]. Journal of Engineering for Power, 1981, 103: 1- 12

[2] Wisler D C, Beacher B F. Improved Compressor Performance Using Recessed Clearance (Trenches) Over the Rotor[R]. General Electric Co, A IAA- 86- 1745, (1- 13).

[3] 朱俊强. 四种不同型式机匣处理的实验研究及机理分析[J]. 推进技术, 1997, 9: 567- 570

[4] Thompson D W, King P I, Rabe D C. Experimental Investigation of Stepped Tip Gap Effects on the Performance of a Transonic Axial-Flow Compressor Rotor[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 477- 485

[5] 朱俊强. 斜沟槽型机匣处理的实验研究[J]. 航空动力学报, 1998, 1(1): 24- 26

[6] Graf M B, Wong T S, Greitzer E M, Marble F E, Tan C S, Shin etc. Effects of Nonaxisymmetric Tip Clearance on Axial Compressor Performance and Stability[J]. Transaction of the ASME, 1998, 120: 648- 661

(责任编辑 吴一黄)

致 谢

本刊从今年下半年第 17 卷第 3 期开始由季刊改成双月刊, 全年共出了 5 期。在 17 卷卷终之际,《航空动力学报》对第 17 卷 1~ 5 期的审稿专家们的辛勤劳动和对本刊的大力支持表示衷心的感谢! 第 17 卷审稿人名单(按姓氏笔画为序):

于达仁	于维风	马 枚	王 强	王正明	王如根	王仲奇
王保国	王延荣	王建军	王锁芳	王振国	王镛根	王慧玉
方宗德	叶中元	尹泽勇	甘晓华	冯 青	冯国泰	朱之丽
朱之樨	朱梓根	朱惠人	孙建国	印国泰	刘 宇	刘 波
刘宝杰	刘启洲	尘 军	吕亚东	吕文林	吕振中	李 琳
李其汉	李为国	吉洪湖	杨士杰	杨茂林	吴寿生	吴建军
何国瑜	严传俊	陆 山	陆亚钧	陆 震	陈大光	陈乃兴
陈启智	陈泽民	陈国林	陈焕倬	陈静宜	邵万仁	邹正平
尚 义	单 鹏	张 平	张 津	张国舟	张远君	张育林
张振鹏	张靖周	胡 骏	郑克扬	孟庆明	洪 杰	洪其麟
赵晓路	饶寿期	姜培学	袁培益	陶 智	陶德平	徐国强
徐通源	夏智勋	高 歌	高德平	顾维藻	聂景旭	桂幸民
唐海龙	黄太平	黄伟光	黄金泉	黄熙君	曹玉璋	曹用涛
常海萍	龚允怡	彭晓峰	温卫东	程显辰	蒋东翔	蒋浩康
欧阳祖行	蔡元虎	蔡体敏	蔡国标	蔡 娜	蔡睿贤	廉小纯
樊思齐	廖明夫	潘锦珊	戴根华			